

汽车轻量化研究现状及发展趋势探讨

雷先华，文涛，鲁仕豪，阳移恒，毛圣
湖南交通工程学院 湖南衡阳 421000

摘要：随着汽车数量的增加，空气质量问题变得越来越受到关注。因此，积极寻求更先进的燃料和材料、更低的油耗、更高的安全性等方案，成为当今世界所面对的巨大挑战。在这种情况下，“低能耗”和“低排放”的汽车已经成为汽车行业必须解决的一个重大课题。为达到节能环保的要求，在保证安全的情况下，实现汽车极致轻量化是可行的。主要对汽车轻量化在材料、结构优化及制作工艺的研究现状进行简述，并对未来发展趋势进行展望。

关键词：汽车轻量化；节能；汽车材料；结构优化
DOI:10.16173/j.cnki.ame.2024.06.013

《第二次全国污染源普查公报》^[1]显示，机动车排放的氮氧化物占全国排放总量的33.3%；并且，在全国主要城市的大气细颗粒物（PM2.5）的源解析结果显示，北京、上海、杭州等城市的移动源排放占比分别达到了45.0%、29.2%和28.0%，已成为PM2.5的首要来源。这些数据表明汽车排放污染的问题依旧严重。

道路交通排放已经占到全球碳排放总量的18%，是温室气体排放的重要组成部分。巴斯夫公司（BASF SE）数据分析，若汽车整车质量降低10%，燃油效率可提高6%~8%；汽车整备质量每减少100kg，每百千米油耗可降低0.3~0.6L；汽车质量降低1%，油耗可降低0.7%。

车身在实现轻量化后节能减排，能改善空气质量。因此，实现汽车轻量化是未来的大势所趋，也是未来汽车发展绕不过的话题。与汽车动力装置和传动装置的技术改革相比，对于汽车轻量化改革是减少能源消耗和排放的最有效措施之一。要突破整车轻量化

技术，需从汽车材料、结构和工艺三个方面进行研究。

汽车轻量化的方法

1.材料轻量化

汽车轻量化的关键是研发，在保证强度情况下能大幅度减轻质量的轻质新材料。全球大型汽车公司和材料制造商都将轻型材料的研发放在首位，轻量化的研究和应用水平已经成为大型制造商的标准，决定他们是否可以开发用于制造汽车的技术和新材料。

目前，轻型汽车的新材料主要分为金属和非金属材料。

（1）金属材料 金属材料有高强度钢、高强度铝合金和镁合金等。

1）高强度钢具有较高的强度和良好的延塑性，可以在保证汽车安全性能的前提下，使用较薄的钢板来

实现汽车结构的轻量化。在汽车中应用的高强度钢可以提高汽车的车身强度，从而在碰撞事故中提供更好的保护性能。

2) 铝合金具有较高的强度，同时也有不错的耐撞性，能在碰撞过程中吸收更多能量，从而提高车辆的安全性能。与钢材料相比，铝合金的密度仅为前者的三分之一，采用铝合金材料可以显著降低汽车的整体质量。这将有助于减少燃油消耗，降低CO₂排放，从而实现环保目标。铝合金废料也更易于回收和再利用，有利于实现资源的可持续利用。

在目前市场上，普遍采用高强度钢与铝合金相结合的方式，在提高汽车安全性的前提下实现轻量化，例如在特斯拉的Model 3中，在一些车身的重要部分，例如纵防撞钢梁、门槛梁以及车身侧面A、B柱等位置使用了超高强度钢，而在车身后部的铝材料占比达到了30.5%。此外，特斯拉在车身底部位置还额外设计了三条横梁，这三条横梁为马氏体钢，不仅可以让车辆拥有更好的强度，同时还可以抵御来自侧面的碰撞。采用这些高强度钢和铝合金等轻量化材料，特斯拉的汽车相较于其他品牌的传统汽车可以减重10%~20%^[2]。

3) 镁合金是目前已知最轻的工程结构金属材料，其密度远低于钢铁和铝合金，并具有良好的可塑性和可锻性，便于加工成各种复杂的汽车零部件，是用于汽车轻量化的新兴材料。

镁合金还具有优良的减振和降噪性能，主要应用于发动机部件、车架和底板等，可以有效地降低汽车的质量，提高能效和减少CO₂排放。同时，镁合金还具有优异的散热性能和抗振性能，可以提高车辆的安全性能和舒适性。

然而，镁合金也存在一些缺点，例如成本较高、耐腐蚀性较差等。此外，由于镁合金的密度较低，使得它的抗撞击能力较差，因此在一些需要承受较大冲击的部位，如车门、保险杠等，还需要使用其他材料进行加固。

(2) 非金属材料 由于汽车轻量化的需求越来越高，非金属材料的应用领域正不断拓宽，而塑料制品的应用尤为普遍，出现“以塑代钢”^[3]为汽车减重的情况。它们正被视为一种新兴的能源来源，并且正在被引入汽车工业。

高分子复合材料由于密度小、能够可塑性加工、回收利用率高等优点，成为轻量化材料重点发展方向之一，不局限于内饰，还包括各种零部件。最具代表的是PDCPD^[4]（聚二甲氧基硅烷增强聚合物），这是一种新型的高性能复合材料，具有优异的力学性能、耐腐蚀性和耐磨性等特点。在汽车轻量化领域，PDCPD材料通常用于制造车身结构、底盘和零部件等部位。在全球范围内许多拥有先进技术的汽车生产商，如宝马、奔驰、奥迪及沃尔沃等，已经把使用塑料制品的数量视为衡量其生产能力的关键因素。

2. 结构优化

汽车结构优化通过设计、拓扑、形状及尺寸等方面来进行实现轻量化。

1) 在汽车结构设计时通过综合考虑多个学科^[5]的因素，例如结构、流体、热及电磁等，对汽车的结构进行全面优化。这种优化方法可以综合考虑各种因素对结构性能的影响，以达到最优的设计效果。

2) 拓扑^[6]是重点研究几何图形随着形状的不断变化而保持不变的相关特性，在汽车领域可以通过拓扑的方法使结构更加合理来节省空间，各零件尺寸参数通过模拟寻找出节省空间且强度更高的设计参数组合，如板材厚度、截面面积等，分析零部件的尺寸参数对于车身强度和碰撞安全的影响，保证原有的强度和性能的情况下假设零部件尺寸参数找到最优设计参数组合，改变结构的一些特征参数。在汽车上可以对车身，悬架，动力系统如发动机、变速器、传动轴等部件进行拓扑优化，以达到减轻质量和提高性能的目的。

3) 形状优化是材料形状和结构的优化，通过指定网格节点的移动空间，来寻找结构最佳的过渡曲线、边界形状等来提高结构的刚度、模态、减少应力集中等。形状优化过程相当于改变结构的三维模型，但是这种方法并不需要重新划分网格，所以设计效率大大提高。

4) 尺寸优化主要集中于对零部件截面形状和尺寸的优化。根据等强度原则，可以通过调整截面的形状和尺寸，使零部件在满足性能要求的条件下，尽可能地减薄壁厚，从而减少材料的使用量，达到轻量化的目的。此外，尺寸优化还可以通过减小零部件的总

体尺寸来实现轻量化。在保证结构强度和刚度的前提下，可以通过减小零部件的长度、宽度和高度等参数，减小结构的外形尺寸，从而降低材料的用量，实现轻量化。值得注意的是，尺寸优化需要综合考虑制造工艺、装配要求、材料性能等因素的影响。在优化过程中，需要确保优化后的零部件能够满足制造和装配的要求，同时还需要保证其具有足够的强度和刚度，能够承受各种载荷和应力。

3. 工艺优化

工艺优化可以从汽车的一体化压铸^[7]与激光焊接^[8]着手。

1) 一体化压铸工艺^[3]具有低成本、高效率的优势，在近几年，许多新能源车企都开始争先布局大型压铸机。例如，小鹏黄埔工厂即将上线一台16 000t的压铸机，小米汽车应用了小米的超级大压铸技术，即9100t一体化压铸工艺。

在材料成本方面，一体化压铸能够减少零部件数量，降低材料用量，还能避免边角料的产生，实现材料接近100%的利用率。在人力成本方面，一体化压铸技术能够大量减少焊接点位，从而降低对焊接技术工人的需求。

以特斯拉Model 3为例，Model 3后底板的70余个零部件变为一体压铸的2个大件，焊接点从大约700~800个直接减少到50个，所需的技术工人也缩减至原来的十分之一，显著降低了零部件生产的模具成本和组装的生产线成本。因为铝材料自身的特性，铝车身还存在很多技术问题，比如板材延伸率最大只有30%，导致冲压加工成形困难，售后也存在因为焊接修复困难，备件更换昂贵等问题。特斯拉开启了在电动车车身上应用的先河，也是车身制造的一次技术革新。

随着一体化压铸工艺的出现，铝材质零件比例不断提升得到快速的实现。在轻量化方面优势特别突出，一体化铝合金压铸车身的质量约为250kg，传统冲压焊车体质量约400kg，最大减重可达200kg。在材料利用率方面，铝合金压铸也具有一定优势，冲压件的综合材料利用率在70%左右，传统钢制车身生产投入的钢板为480~640kg，铝合金压铸的材料利用率可以在90%以上。

2) 激光焊接^[8]是一种先进的非接触式加工方式，

可以实现精密焊接，提高了连接的坚固性、无缝性、精密性和清洁性。其次，激光焊接能够用更多的冲压件代替铸造件，用连续的激光焊缝代替分散的点焊缝。这样可以减少搭接宽度和一些加强部件，降低车身结构本身的体积，从而减少了车身的质量。满足汽车节能减排的要求。

未来发展展望

国务院办公厅正式发布的《新能源汽车产业发展规划（2021—2035年）》^[9]提出，要突破整车轻量化等共性节能技术，以合金材料为重点建立体系，在此体系上进行轻量化材料的创新。

展望未来，随着科技的不断进步和创新，汽车轻量化将继续沿着新材料、新工艺和优化设计的方向发展，为汽车产业带来更加绿色、高效和智能的未来。

1) 在新材料方面，除了已经广泛应用的高强度钢、铝合金、镁合金等材料外，碳纤维复合材料、钛合金、塑料和聚合物等新材料也可能会得到更广泛的应用。这些新材料具有更高的比强度和比刚度，能够有效地降低汽车的质量，提高汽车的燃油经济性和动力性能。

2) 在新工艺方面，激光焊接、热成形、高压铸造、内高压成形及辊压成形等先进工艺可能会得到应用和优化。同时，3D打印技术、机器人自动化等新技术也可能会逐渐应用于汽车轻量化领域，以提高生产效率和降低成本。

3) 除了新材料和新工艺，未来汽车轻量化还可能继续注重结构设计的优化。例如，采用的拓扑优化、形状优化等结构优化技术，以实现更加合理的材料分布和结构设计，从而达到更好的轻量化效果。

此外，汽车轻量化发展还需要考虑环保和可持续性等因素。因此，未来可能会更加注重使用可再生材料和可回收材料，以降低汽车制造对环境的影响。

总之，未来汽车轻量化发展将继续采用新材料、新工艺和优化结构设计等多种手段，以实现更好的轻量化效果，同时注重环保和可持续性等因素。

结语

综上所述，汽车轻量化是未来汽车发展的一个重要方向。轻量化无论是在节省燃料还是保护环境以及

(下转第19页)

表4 系统台架耐久试验工况

工况	载荷/kN	频率/Hz	循环次数/次	测试结果
制动工况	0~11.2	3	5万	OK
侧向工况	±9.1	3	5万	OK
加速工况	-12~+17	3	5万	OK
上跳工况	-5.6~+13.8	3	10万	OK
下跳工况	-10.3~0	3	5万	OK

经过台架耐久试验，产品试验结果合格。

久试验车验证。

经过4个月试验验证，试验顺利结束，短纵拉杆产品无任何失效问题，产品合格。

产品切换

经以上产品方案制定、方案论证、仿真分析、系统台架试验以及整车综合耐久试验，最终确认产品方案可行，可靠性高，产品质量减重目标达成，并且成本降低，该方案可以实施。

结语

通过对本案例实施过程进行总结分析发现，降重

改善方案要快速、稳妥地实施，要从需求出发制定合理目标，方案分析以及验证过程至关重要。重点分析现有方案，通过对比分析，仿真验证等措施制定行之有效，确定可实施性强的方案。通过试验前产品状态确认，保证样品状态满足设计要求。该案例的成功实施对以后新能源产品降低质量的方案制定以及验证实施过程有指导作用。

参考文献：

[1] 陈祝年.焊接工程师手册[M].北京：机械工业出版社，2002.

[2] 闵海涛，王建华.汽车设计[M].5版.北京：机械工业出版社，2021.

[3] 李庆利.浅析VAVE在新能源汽车行业的运用[J].汽车实用技术，2021（16）：165-168.

[4] 孙继元.现代成本管理[M].上海：上海财经大学出版社，2007.

[5] 贺巍，何寿芳，田忠达.浅谈价值工程及价值分析在汽车行业中的运用方法[J].汽车实用技术，2021，（17）：189-194.

[6] 朱平，秦玉彬，吴颂，等.汽车底盘后悬位置零部件台架试验方法应用研究[J].装备制造技术，2022，（10）：80-83, 92. **AUTO1950**

2021-12-30（3）.

[4] 马正伟.商用车外观覆盖件PDCPD材料的应用探究[J].山东化工，2023，52（12）：69-71.

[5] 陈馨，邓晓龙，谷叶水.发动机油底壳结构减重优化[C].结构及多学科优化工程应用与理论研讨会2009（CSMO—2009）论文集，2009.

[6] 瞿元，徐有忠，张林波，等.拓扑优化技术在汽车结构件设计中的应用[C].中国力学.

[7] 田峰，王高祥，周江奇.基于高压压铸工艺的车身一体化开发流程优化研究[J].模具工业，2023，49（8）：17-23.

[8] 林文超.汽车铝合金车身焊接工艺开发与应用分析[J].时代汽车，2023（15）：132-134.

[9] 张继方，徐颖若.新能源汽车产业发展规划（2021—2035）——新能源汽车技术专业教改探究[J].河北农机，2021（2）：93-94. **AUTO1950**

（上接第8页）
提高速度等方面都在汽车行业中具有极高的竞争优势。新材料、新制作工艺、新结构，都是轻量化的有力手段。

近几年环境政策以及国家“双碳”计划的要求，对于汽车厂商要求越来越严格，对于厂商的研发技术是一种考验。汽车轻量化已经成为汽车厂商急需解决的问题。越来越多的厂商开始着手研发来解决这一关乎汽车厂商的生存问题。随着技术发展，轻量化技术的推广应用，将会有利于我国汽车工业转型升级和高质量发展。

参考文献：

[1] 第二次全国污染源普查公报[J].环境保护，2020，48（18）：8-10.

[2] 杜莎.特斯拉、蔚来的汽车轻量化技术[J].汽车与配件，2020（17）：42-43.

[3] 潘亚男.“以塑代钢”为汽车减重[N].中国石化报，